

**С.Н. Масаев**

### **АЛГОРИТМ ВЫБОРА МЕТОДА ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫМ ДВОЙНИКОМ ПРЕДПРИЯТИЯ**

*Возрастает объем обрабатываемой информации при анализе и управлении деятельностью предприятия как системы. Объем обрабатываемой информации напрямую зависит от размерности этой системы. В работе деятельность предприятия формализуется как цифровой двойник предприятия. Цифровой двойник предприятия анализируется как динамическая система. Выполнена идентификация предприятия как динамическая система. Цифровой двойник предприятия формализован как балансовая модель В. Леонтьева. Создан алгоритм оптимального управления цифровым двойником предприятия. В качестве параметров оптимального управления рассмотрены функции: траектория системы, время выполнения алгоритма и показатель состояния системы. В алгоритме для управления предприятием использованы методы: таксономия Блума, компетенции выпускников по специальностям СФУ и Национальные квалификационные рамки РФ. Идентификация процессов предприятия выполнена способом, на который получен патент. Алгоритм выполнен в авторском комплексе программ для анализа системы размерностью 1,2 млн. значений. Исследование показало существенные изменения значений функций оптимального управления, характеризующих состояния динамического объекта в зависимости от выбранных методик. Расчеты показали, как влияет выбор методики управления на оптимальность решений. Отображено состояние предприятия через компетенции персонала: психомоторные, когнитивные и аффективные. Установлено, что при низких когнитивных и аффективных способностях персонала начинает преобладать психомоторная деятельность, мало приводящая к результату. С ростом когнитивных способностей персонала психомоторная деятельность становится более адекватной на внутренние задачи и влияние параметров внешней среды. Через интегральный показатель выполнена оценка внедрения методик в управление предприятием. Выполнена оценка оптимальности решения управления цифровым двойником предприятия как динамической системой.*

*Теория управления; цифровой двойник предприятия; динамическая система; параметры внешней среды; оптимальное управление; алгоритм; методики.*

**S.N. Masaev**

### **ALGORITHM FOR OPTIMAL CONTROL THE DIGITAL TWIN OF THE ENTERPRISE**

*The volume of processed information increases when analyzing and control the activities of an enterprise as a system. The amount of processed information directly depends on the dimension of this system. In the work, the activity of the enterprise is formalized as a digital twin of the enterprise. The digital twin of the enterprise is analyzed as a dynamic system. The enterprise was identified as a dynamic system. The digital twin of the enterprise is formalized as V. Leontiev's balance model. An algorithm for optimal control of the digital twin of the enterprise has been created. The following functions are considered as parameters of optimal control: the trajectory of the system, the execution time of the algorithm and the indicator of the state of the system. In the algorithm for enterprise control, the following methods were used: Bloom's taxonomy, the competence of graduates in the SFU specialties and the National Qualifications Framework of the Russian Federation. The identification of the enterprise processes is carried out by the method for which the patent has been obtained. The algorithm is implemented in the author's software package for analyzing a system with a dimension of 1.2 million values. The study showed significant changes in the values of the optimal control functions characterizing the states of a dynamic object, depending on the selected techniques. Calculations have shown how the choice of control method affects the optimality of decisions. The state of the enterprise is displayed through the competencies of the personnel: psychomotor, cognitive and affective. It was found that with low cognitive and affective abilities of the staff, psychomotor activity begins to prevail, which leads to little result. With the growth of the cognitive abilities of the*

*personnel, psychomotor activity becomes more adequate to the internal tasks and the influence of the parameters of the external environment. An integral indicator was used to assess the implementation of methods in enterprise control. The estimation of the optimality of the solution for control the digital twin of the enterprise as a dynamic system is carried out.*

*Control theory; digital twin of an enterprise; dynamic system; parameters of the external environment; optimal control; algorithm; methods.*

**Введение.** С развитием цифровых технологий создание цифрового двойника предприятия становится все более актуальным направлением. Создание цифровой копии предприятия подразумевает идентификацию всех выполняемых им производственных, вспомогательных и административных процессов. Самые сложные процессы для идентификации являются административные, так как они слабо формализуемые и трудно прогнозируемые. Стоит отметить, что административные процессы одни из самых сложных в изучении для автоматизации и в других областях теории управления.

Для достижения точности управления необходимо изучаемое предприятие представить как систему, которая характеризуется процессами. Для установления взаимосвязи административных процессов между собой и со всем остальными требуется значительное время. Например, если тратить на описание одного процесса со всеми начальными около 2 минут, то на описание около 350 процессов уйдет 2 месяца, на описание 2 000 процессов уже уйдет 5 лет, а на описание 11,5 млн процессов уже потребуются 25 тысяч лет. Следовательно, мы имеем существенное ограничение, неопределимое в рамках одной человеческой жизни, на управление системой из-за увеличения размерности системы.

Цель статьи: выполнить оптимальное управление предприятием через его цифровой двойник.

Достижение поставленной цели возможно через следующие задачи:

- ◆ идентификация предприятия как динамической системы;
- ◆ создание цифрового двойника предприятия;
- ◆ создание алгоритма оптимального управления цифровым двойником предприятия.

Классическими в анализе динамических систем считаются работы авторов: J.V. Poncelet, братья Siemens Werner & Wilhelm, J.C. Maxwell, E.J. Routh, H. Poincare, A. Stodola, A. Hurwitz, И. А. Вышнеградский, П.Л. Чебышев, А.М. Ляпунов, N. Wiener, L.A. Mac-Coll, H. Bode, W. Shannon, St. Beer, W.-R. Ashby, R. Bellman, R. Kalman, E.I. Jury, J.T. Tou, И.Е. Жуковский, Н.Г. Четаев, И.Н. Вознесенский, А.А. Андронов, Г.В. Шипанов, А.И. Лурье, Н.Н. Красовский, Л.С. Понтрягин, А.М. Летов, А.А. Фельдбаум, Я.З. Цыпкин, А.А. Красовский, В.А. Якубович и др. [1–15].

Классическими в анализе управления предприятием считаются работы авторов: В.В. Леонтьева, С.А. Айвазяна, И.В. Елохова, Г. Б. Клейнер, А.Г. Гранберг, В.Ф. Кротов, А.Г. Аганбегян, Р. Солоу, К. Эрроу, A. Schminke, J. Van Biesebroeck [16–21].

**Метод.** В качестве модели предприятия, как системы, будем использовать балансовую модель В. Леонтьева [16]. В матричной форме система имеет вид

$$X = AX + Y, \quad (1)$$

где

$X = (X^1, X^2, \dots, X^n)^T$  – вектор сумм единиц ресурса в группе  $X^n$  процессов  
 $x_j^i = [i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n]$  (количество единиц ресурсов из  $i$  процесса на создание ресурса  $j$  процесса);

$Y = (Y^1, Y^2, \dots, Y^n)^T$  – вектор сумм единиц дополнительного ресурса  $Y^n$  привлеченного со стороны на предприятие процессами  $X^n$ ;

$A = (a_j^i), i, j = \overline{1, n}$ , – коэффициенты матрицы взаимодействия процессов  $x_j^i$ .

Из модели предприятия (1) следует две задачи: наблюдения  $(E - A)X = Y$  ( $E$  – единичная матрица) и управления  $(E - A)^{-1}Y = X$ . Вторую задачу управления решают через оптимизационный метод [22].

Стоит отметить, что модель предприятия (1) можно расширить до модели предприятия с управлением по аналитическим оценкам с учетом отклонений достижения цели при влиянии параметров внешней среды, матрицей структуры объекта, матрицы метода управления и матрицы наблюдения. Эффективность управления предприятием более сложной моделью представлена в отдельной работе [23]. Через более сложную модель возможно регулировать количество параметров для наблюдения, но для этого надо выполнить полную идентификацию процессов предприятия в каждый момент наблюдения, т.е. эффективность использования оптимизационного метода в модели (1) зависит от точности идентификации процессов  $x_j^i$ .

Идентификация объекта как системы выполняются следующим способом [24]. Есть цифровая копия предприятия  $M$ , где  $v (v \in M)$  его процессы с именем из словаря методики управления, образованные от

$$v = (x, y), \quad (2)$$

где  $V$  – наименование процесса по методике управления,  $x \in X$ ,  $y \in Y$  процессы соответствующих групп процессов  $X$  и  $Y$ .

Процесс  $x_j^1$ , далее для удобства будем использовать обозначение  $x^1$ , является процессом цифровой копии предприятия  $M_x$ , так как имеем результат его работы  $y^1$  и  $(x^1, y^1) \in M$ . Процесс  $x^2$  не относится к цифровой копии предприятия  $M$  всех процессов, если отсутствует точка  $y^2 \in Y$ .

Деятельность цифровой копии предприятия  $M$  задается и оптимизируется через функционал  $\oint$  в паре точек  $v = (x, y)$  по процессам, т.е. задает  $v \in M$  и ставит в соответствие действительное число  $\oint_v$  – площадь фигуры.

Тогда цифровой двойник предприятия представлен  $x$  вектором  $n$ -мерного векторного пространства  $x = (x^1, x^2, \dots, x^n)$ ,  $x \in X$  пространства состояния системы  $X$ . Соответственно деятельность цифровой копии предприятия представляется динамической системой  $S = \{T, X\}$  с траекторией  $x(t) = (x^1(t), x^2(t), \dots, x^n(t))$ , где  $t = [t_0, t_0 + 1, \dots, T]$  – моменты времени,  $t_0$  – начальный момент времени, а  $t_1$ ,  $T$  – момент окончания работы.

Векторная форма

$$x(t+1) = f(t, x(t), u(t))$$

или

$$x^i(t+1) = f^i(t, x(t), u(t)), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

где  $u(t)$  – управление однозначно задает отвечающую ей траекторию без ограничений на правую часть уравнения (3), тем самым обеспечивается единственность решения (решение задачи Коши).

В  $t = 0$  (3) имеет вид  $x(1) = f(0, x_0, u(0))$ . Полученное значение  $x(1)$  и  $t = 1$  подставляем в (3) получаем  $x(2)$  и по  $T$  момент окончания работы  $x(T)$ . Траектория динамической системы по выбранному методу управления равна  $(x(t), u(t)) \in V^t$  для  $t$  где  $0 \leq t \leq T$ . Тогда оптимальное управление сводится к нахождению, через алгоритм, траектории процессов  $v^* = (x^*(t), u^*(t))$  цифровой копии предприятия  $M$ , на котором функционал  $\phi$  достигает минимального значения при необходимости минимизации затрат или максимального значения при привлечении ресурсов на предприятие (оптимизации детальности).

Из  $v^* = (x^*(t), u^*(t))$  следует, что  $u^*(t)$  – оптимальное управление оптимального процесса  $x^*(t)$ :

**Постановка задачи.** Предприятию через его цифровую копию  $M$ :

1. Найти оптимальную траекторию  $v^* = (x^*(t), u^*(t))$  по выбранной методике управления  $v^*$  с достижением условия  $\phi(v) \rightarrow \min_{v \in M} \phi(v)$ .

2. Найти минимизирующую последовательность  $\{v_s\} = \{x_s^*(t), u_s^*(t)\} \in M$  с достижением условия  $\phi(v^*) \rightarrow \inf_{v \in M} \phi(v)$ .

При этом  $\phi(v) = \int_0^T f^0(t, x, u) dt$  характеризует качество процесса,

$\phi(v) = F(x(T))$  характеризует время расчета алгоритма поиска оптимальной траектории,  $\phi(v) = G$  характеризует состояние предприятия через интегральный показатель [24].

**Алгоритм расчета.** 1 этап. Свидетельство ЭВМ № 2013614410. Выполнение процессов фиксируется как  $x^i(t)$  по способу [24]. Зафиксированные процессы

$x(t) = [x^1(t), x^2(t), \dots, x^n(t)]^T \in X$  образуют пространство  $X$ , где  $n$  – количество процессов,  $T = \{t : t = 1, \dots, T_{\max}\}$  – период анализа. Смоделированное предприятие представляем цифровым двойником как многомерную динамическую систему  $S = \{T, X\}$ , Вычисляем интегральные показатели системы характеризующие ее состояние

$$G = \sum_{i=1}^{T=\max} \sum_{j=1}^n G_i(t), \quad R_i(t) = G_i(t) = \sum_{j=1}^n |r_{ij}(t)|,$$

$R_k(t) = \frac{1}{k-1} \overset{o}{X}_k^T(t) \overset{o}{X}_k(t) = \left\| \overset{o}{r}_{ij}(t) \right\|$ , где  $k$  – глубина расчета (в статье  $k=6$  месяцев),  $r_{ij}(t)$  – коэффициенты корреляции переменных  $x^i(t)$  и  $x^j(t)$  в момент времени  $t$ . Значение  $k$  возможно регулировать от 2 и до  $T-2$  [25]. Если идентифицированная система характеризует предприятие, то выполняем этап 2, иначе выполняем 1 этап.

2 этап. Свидетельство ЭВМ № 2017616973. В идентифицированной системе выбираем методику управления  $V$ , сопоставляя процессы  $x^i_j$  с наименованием процессов  $v_i^j$  методики. Соответственно методика управления определяется вектором на-

именований значений  $v(t) = [v^1(t), v^2(t), \dots, v^n(t)]^T \in V$  –  $n$  – размерностью. Деятельность системы ограничена ресурсами  $C$ , тогда  $V(X) \leq C$ . Все подпроцессы процессов системы имеют такое же ограничение. Если выбранный метод управления охватывает все процессы, то выполняем этап 3, иначе повторяем выполнение этапа 2. Управление системой возможно и без описания  $x^i(t)$  через контур управления. Если система идентифицирована  $\hat{\phi}(v) = G$  то выполняем этап 3, иначе 1 этап.

*3 этап.* Свидетельство ЭВМ № 2008610295. Проверяем управление на оптимальность. Если решение не оптимально по  $\hat{\phi}(v) \rightarrow \min_{v \in M} \hat{\phi}(v)$  и не устраивает нас, то возвращаемся на этап 1, иначе переходим к этапу 4.

*4 этап.* Свидетельство ЭВМ № 2017616970. Оцениваем эффективность управляющих воздействий  $\hat{\phi}(v) = \int_0^T f^0(t, x, u) dt$ . Если эффективность нас не устраивает, то задаем новые управляющие воздействия от руководства предприятия и переходим к этапу 1, иначе конец алгоритма.

**Объект исследования.** Предприятие, используемое в качестве примера (как динамический объект) характеризуется производственными, обслуживающими и административными процессами. Производственные процессы включают в себя все технологические процессы на которые задействуются: основные средства, рабочие, товарно-материальные ценности и др. Вспомогательные процессы включают в себя основные средства, работников, товарно-материальные ценности задействованные на поддержания основных процессов производства. Первый год характеризуется процессами, когда создаются и закупаются основные средства и нанимается персонал. Второй год характеризуется процессами, когда начинается формирование запасов сырья и материалов перед запуском основного производства. Третий год характеризуется процессами, когда выполняется запуск основного производства. Четвертый и пятый год характеризуются процессами, когда выполняется нормальная работа предприятия. Полное описание цифрового двойника в отдельной работе [26].

Методика управления  $V$  выбирается исходя из компетенций персонала осуществляющего работу на предприятии. В качестве управления можно задать 29 методик: классификатора целей [27], классификатора стратегий [28], стандарт информационной безопасности BS 7799-3-2006 [29], V-modell [30], Hermes [31], VZPM [32], PRINCE2 [33], DIN69901 [34], Bsi [35, 36], Межгосударственная система стандартов [37], КАНАРСПИ [38, 39], CAN-CSA [40], ANCSPI [41], Solow [20], PROMAT [42], P2M [43], жизненные циклы предприятия Ицхака Адизеса [44], Сто правил НАСА [45], должностные инструкции [46], компетенции выпускников СФУ [47], Универсальные компетенции [48], Дублинские Дескрипторы [49], Квалификационные Европейские Рамки [50, 51], Национальные Квалификационные Рамки [52], компетенции IPMA [53], компетенции РМВок [54], компетенции P2M [55], компетенции Hermes [56], Таксономия Блума [57, 58] и др.

В данной статье для управления цифровым двойником предприятия будем использовать методики: Таксономия Блума, компетенции выпускников по специальностям СФУ, Национальные квалификационные рамки РФ.

**Моделирование.** Идентифицированная размерность динамической системы (цифрового двойника  $M$ )  $n - 1,2$  млн. значений. Методика управления  $V$  – таксономия Блума. Расход ресурса в обычном режиме  $X$  или  $(x(t), u(t)) \in V'$  равен 5 641 442 единиц ресурса за пять лет.

Используя алгоритм процессов предприятия можно наблюдать по модели (1) в каждом месяце  $Y(t)$  компетенции персонала этого предприятия:  $v^1$  – когнитивные,  $v^2$  – аффективные,  $v^3$  – психомоторные,  $v^4$  – процессы, которые невозможно отнести к выбранной методике (рис. 1).



Рис. 1. Динамика компетенций персонала

Так как моделируется деятельность предприятия с момента его создания, то у персонала первые 8 месяцев больше тратится ресурсов на психомоторные компетенции  $v^3$ , которые носят менее осознанный характер. В 4 и 6 периодах психомоторные компетенции  $v^3$  требуют все меньше ресурсов, а аффективные  $v^2$  и когнитивные  $v^1$  компетенции требуют больше ресурсов. Значит с ростом умственных способностей персонала предприятия снижается количество бесполезного физического труда.

Во всех периодах наблюдается снижение затрат на  $v^2$  аффективные компетенции при росте затрат ресурсов на  $v^3$  когнитивные компетенции персонала. Значит с ростом умственных способностей у персонала несознательная (аффективная) деятельность снижается. С каждым годом когнитивные способности персонала возрастают.

На третий год когда предприятие запускает основное производство наблюдается рост психомоторных  $v^3$ , когнитивных  $v^1$  и аффективных  $v^2$  компетенций.

После 34 периода когнитивные способности персонала достигают такого уровня, что психомоторные компетенции персонала являются реакцией предприятия на влияние параметров внешней среды. Значит в условиях нормальной работы предприятия с 36 месяца по 60 месяц когнитивные и аффективные способности персонала обеспечивают адекватные затраты ресурсов на физическую работу персонала, чем с 1 месяца по 8 месяц.

Рассчитаем функционал  $\oint(v) = G$ , который характеризует внедрение метода управления через метод таксономии Блума на предприятии. С 7 периода нанимается три менеджера по персоналу в соответствии с направлениями деятельности предприятия для ведения выбранной методики управления на предприятии (динамической системе). Через 6 периодов менеджеры освобождаются от должностей. Время выполнения алгоритма через метод таксономии Блума  $\oint(v) = F(x(T)) = 417$  минут. Изменения  $\oint(v) = G$  происходят за счет дополнительного расхода ресурсов в процессах (заработная плата, командировки, обуче-

ние выбранной методике управления, налоги, канцелярия, связь) на внедрение управления динамической системой по методу таксономии Б. Блума и составят 16 045 тыс. единиц ресурса. Общие затраты предприятия составят  $v^* = (x^*(t), u^*(t)) = 5\,659\,760$  тыс. единиц ресурса. Методом интегральных показателей выполнена оценка режимов работы динамической системы: первый режим  $G_{\text{обычн\_режим}}^k - 5\,069,93$  единиц и второй режим после внедрения управления таксономии Б. Блума  $G_{\text{Блум}}^k - 5\,491,18$ . Следовательно, оценка перехода на управление объектом через таксономию Б. Блума оценивается как  $\Delta G = G_{\text{Блум}}^k - G_{\text{обычн\_режим}}^k = 421,25$ . Время выполнения алгоритма с методом управления компетенции выпускников по специальностям СФУ  $\oint(v) = F(x(T)) = 412$  минут. Изменения  $\oint(v) = G$  происходят за счет дополнительного расхода ресурсов на процессы (заработная плата, командировки, обучение, налоги, канцелярия, связь) на внедрение метода управления динамической системой через компетенции выпускников по специальностям СФУ и составит 34 363 тыс. единиц ресурса. Общие затраты ресурса составят  $v^* = (x^*(t), u^*(t)) = 5\,675\,805$  тыс. единиц ресурса.

Методом интегральных показателей выполнена оценка режима работы цифрового двойника предприятия как динамической системы при режиме после внедрения управления через компетенции выпускников по специальностям СФУ  $G_{\text{комп\_вып\_СФУ}}^k - 5\,491,3$ . Следовательно, оценка перехода на управление объектом через компетенции выпускников по специальностям СФУ оценивается как  $\Delta G = G_{\text{комп\_вып\_СФУ}}^k - G_{\text{обычн\_режим}}^k = 421,4$ . Время выполнения алгоритма с управлением через Национальные квалификационные рамки РФ  $\oint(v) = F(x(T)) = 430$  минут. Изменения  $\oint(v) = G$  происходят за счет дополнительного расхода ресурсов на процессы (заработная плата, командировки, обучение выбранной методике управления, налоги, канцелярия, связь) на внедрение методике управления динамической системой по Национальным квалификационным рамкам РФ и составят 14 539 тыс. единиц ресурса. Общие затраты предприятия за пять лет составят  $v^* = (x^*(t), u^*(t)) = 5\,661\,226$  тыс. единиц ресурса. Методом интегральных показателей выполнена оценка режимов работы экономического объекта как динамической системы: первый режим  $G_{\text{обычн\_режим}}^k - 5\,069,93$  единиц и второй режим после внедрения Национальных квалификационных рамок  $G_{\text{НацКвалРамки}}^k - 5\,089,91$ . Следовательно, оценка перехода на управление объектом через Национальные квалификационные рамки РФ оценивается как  $\Delta G = G_{\text{НацКвалРамки}}^k - G_{\text{обычн\_режим}}^k = 19,97$ .

Обобщая расчеты (табл. 1) можно сказать, что наиболее оптимальное [59] управление достигается по функционалу  $\oint(v)$ : через  $F(x(T))$  – метод компетенций выпускников по специальности СФУ, через  $G$  – метод Национальных квалификационных рамок РФ, через  $v^* = (x^*(t), u^*(t))$  – метод таксономии Блума.

Таблица 1

**Оптимальное управление цифровым двойником предприятия**

Метод управления	$\oint(v)$		
	$F(x(T))$ , (мин)	$G$ , (ед.)	$v^* = (x^*(t), u^*(t))$ , (тыс. единиц ресурса)
Таксономия Блума	417	5 491,18	5 659 760
Компетенции выпускников по специальностям СФУ	412	5 491,30	5 675 805
Национальные квалификационные рамки РФ	430	5 089,91	5 661 226

**Обсуждение результатов.** Упомянутые в статье методики управления объединены в единый расчет в отдельных работах [61, 62]. При полной идентификации процессов предприятия в каждый момент времени методы управления определяющую роль не несут. На деятельность предприятия влияет точность факта и прогноза его состояния с учетом факторов внешней среды при полной идентификации процессов предприятия с любым методом управления.

Предложенный в статье алгоритм позволяет каждому департаменту или отделу предприятия использовать методики понятные только им и избежать затрат на внедрение одного метода во все департаменты или отделы предприятия без потери эффективности управления.

По значению  $G$  можно сделать вывод, что адаптация персонала предприятия к методу управления Национальные квалификационные рамки проходит легче, чем через метод компетенций выпускников по специальностям СФУ и таксономии Блума. О адаптационном напряжении более подробно можно прочитать в отдельной работе [23, 60].

Использованный в статье подход управления цифровым двойником предприятия применен для оптимального управления цифровым двойником особой экономической зоны с повышением эффективности реализации инфраструктурного проекта [63, 64], применен для оценки влияния на деятельность предприятия заражения персонала COVID-19 [63], оценки ущерба от санкций [65].

**Заключение.** Задачи, поставленные в начале статьи выполнены:

- ♦ идентифицировано предприятие как динамическая система  $S = \{T, X\}$  через представления балансовой модели В. Леонтьева в векторной форме  $X = AX + Y$ , где  $x^i(t+1) = f^i(t, x(t), u(t))$ ;

- ♦ создан цифровой двойник предприятия  $M_x$  представленный  $x$  вектором  $n$ -мерного векторного пространства  $x = (x^1, x^2, \dots, x^n)$ ,  $x \in X$  пространства состояния системы  $X$  для которой выполнена идентификация процессов  $x_j^i$ ; с результатом их работы  $y^i$  и  $(x^i, y^i) \in M$ ,  $y^i \in Y$ ;

- ♦ создан алгоритм оптимального управления цифровым двойником предприятия через функционал  $\oint$  в паре точек  $v = (x, y)$  по процессам, т.е. заданы  $v \in M$  и сопоставлены в соответствие действительным числам  $\oint_v$  – площадь фигуры.

Расчет выполнялся по оптимальному управлению  $u(t)$  цифровым двойником предприятия  $M_x$ , как динамической системой  $S = \{T, X\}$  методиками  $V$  (Таксономия Блума, компетенции выпускников по специальностям СФУ, Национальные квалификационные рамки РФ) по параметрам:  $n=1,2$  млн. значений,  $T=5$  лет, шагом наблюдения и управления  $t=1$  мес.,  $X(0)=0$  при  $t=0$ ,  $Y(T)=5\ 641\ 442$  единиц ресурса.

Оптимальное управление достигается по функционалу  $\oint(v)$  в:

- ◆  $F(x(T))=412$  минут при использовании метода компетенции выпускников по специальности СФУ;
- ◆  $G=5\ 089,91$  ед. ресурса при использовании метода Национальных квалификационных рамок РФ;
- ◆  $v^* = (x^*(t), u^*(t))=5\ 659\ 760$  тыс. ед. ресурса при использовании метода таксономия Блума.

Следовательно, цель статьи выполнить оптимальное управление предприятием через его цифровой двойник, достигнута.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Винер Н. Кибернетика. – 2-е изд. – М.: Сов. радио, 1968. – 258 с.
2. Красовский А.А. Исторический очерк развития и состояния теории управления // Современная прикладная теория управления. Ч. I. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 400 с.
3. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. – М.: Наука, 1968. – 400 с.
4. Ressler O.E. Chemical Turbulence: Chaos in a Small Reaction-Diffusion System // Naturforsch. – 1976. – Vol. 31. – P. 1168-1172.
5. Tyukin I. Adaptation in Dynamical Systems. – UK, Cambridge University Press, 2011. – 410 p.
6. Lorenz E.N. Deterministic Nonperiodic Flow, J. Atoms. Sci. – 1963. – Vol. 20, No. 2. – P. 130-141.
7. Биркгоф Дж. Динамические системы. – М.: ОГИЗ, 1999. – 480 с. – ISBN 5-7029-0356-0.
8. Гукенхеймер Дж., Холмс Ф. Нелинейные колебания, динамические системы и бифуркации векторных полей. – 2002. – 560 с. – ISBN 5-93972-200-8.
9. Палис Ж., ду Мелу В. Геометрическая теория динамических систем: Введение. – М.: Мир, 1986. – 301 с.
10. Golestani M., Mohammadzaman I., Yazdanpanah M.J. Robust Finite-Time Stabilization of Uncertain Nonlinear Systems Based on Partial Stability // Nonlinear Dynamics. – 2016. – Vol. 85, No. 1. – P. 87-96.
11. Haddad W.M., L’Afflitto A. Finite-Time Partial Stability and Stabilization, and Optimal Feedback Control // Journal of the Franklin Institute. – 2015. – Vol. 352, No. 6. – P. 2329-2357.
12. Jammazi C., Abichou A. Controllability of Linearized Systems Implies Local Finite-Time Stabilizability: Applications to Finite-Time Attitude Control // Journal of Mathematical Control and Information. – 2018. – Vol. 35, No. 1. – P. 249-277.
13. Jenkins M., et al. Export Processing Zones in Latin America. Harvard Institute for International Development, Development Discussion Paper. – 1998. – No. 646 (August).
14. Kumar A., Shankar R., Choudhary A., Thakur L.S. A big data MapReduce framework for fault diagnosis in cloud-based manufacturing // International Journal of Production Research. – 2016. – Vol. 54 (23). – P. 7060-7073.
15. L’Afflitto A. Differential Games, Finite-Time Partial-State Stabilization of Nonlinear Dynamical Systems, and Optimal Robust Control // International Journal of Control. – 2017. – Vol. 90, No. 9. – P. 1861-1878.
16. Leontief W.W. “The Structure of American Economy,” 1919-1939. Cambridge, Harvard University Press, 1941.
17. Кротов В.Ф. Основы оптимального управления. – М.: Высшая школа, 1990. – 430 с.

18. Клейнер Г.Б. Производственные функции: Теория, методы, применение. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 239 с.
19. Канторович Л.В. Математико-экономические работы. – Новосибирск: Наука, 2011. – 760 с.
20. Solow R. A Contribution to the Theory of Economic Growth // Quarterly Journal of Economics. – 1956. – No. 70. – P. 65-94.
21. Schminke A., J. Van Biesebroeck. Using export market performance to evaluate regional preferential policies in China, Review of World Economics (Weltwirtschaftliches Archiv). – Springer; Institut für Weltwirtschaft (Kiel Institute for the World Economy), June 2013. – Vol. 149 (2). – P. 343-367.
22. Масаев С.Н. Модель межотраслевого баланса Леонтьева как задача управления динамической системой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2021. – № 2 (135). – С. 66-82. – Doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-2-66-82>.
23. Масаев С.Н. Методика комплексной оценки управленческих решений в производственных системах с применением корреляционной адаптометрии: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06: защищена 25.03.11: утв. 25.11.11. – Красноярск: СФУ, 2011. – 214 с.
24. Патент № 2741138 С1 Российская Федерация, МПК G05B 19/00, G06F 17/10. Способ идентификации объекта как системы: № 2019143313: заявл. 23.12.2019: опубл. 22.01.2021 / С. Н. Масаев.
25. Mасаев S. Depth of Planning the State of a Dynamic Discrete System by Autocorrelation Function // Proceedings - 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020. – Sochi, 2020. – P. 989-993. – Doi 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208187.
26. Масаев С.Н. Алгоритм оценки состояния системы (санкции, HR, TQM, PMBOK, COVID-19, пожарная безопасность) методом интегральных показателей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2021. – № 1. – С. 36-48. – Doi: 10.24143/2072-9502-2021-1-36-48.
27. Doran G.T. There's a S.M.A.R.T. way to write management's goals and objectives // Management Review. СФУ 1981. СФУ Vol. 70. СФУ Is. 11 (AMA Forum). СФУ P. 35, 36.
28. Chandler A.D. Strategy and Structure: A Chapter in the History of Industrial Enterprises. Cambridge, Mass, MIT Press, 1962. – 463 p.
29. BS 7799-3:2006 "Information security management systems – Part 3: Guidelines for information security risk management".
30. Forsberg K. and Mooz H. The Relationship of Systems Engineering to the Project Cycle // The 12th INTERNET World Congress on Project Management, Center for Systems Management Oslo, Norway, 1994. – 12 p.
31. "HERMES". Federal IT Steering Unit FITSU. Swiss Government. Retrieved 13 May 2016.
32. VZPM Verein zur Zertifizierung von Projektmanagern der SPM Gesellschaft für Projektmanagement and der SGO Gesellschaft für Organisation: Beurteilungsstruktur, Begleitmaterial zur Zertifizierung von Projektmanagern, Switzerland, Ausgabe 1996, Version 1.00 vom 30.11.1996.
33. Ebel N. PRINCE 2:2009 TM – für Projekt management mit Methode. Munchen, Addison-Wesley Verlag, 2011. – 568 p.
34. DIN 69901-1 Projektmanagement – Projektmanagementsysteme Teil1: Grundlagen. Berlin: Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen (NQSZ) im DIN, 2009. – 30 p.
35. ISO Guide 73:2002. Risk management - Vocabulary - Guidelines for use in standards.
36. ISO/IEC 13335-1:2004. Information technology – Security techniques – Management of information and communications technology security – Part 1: Concepts and models for information and communications technology security management.
37. ГОСТ 1.2–2015 «Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Правила разработки, принятия, обновления и отмены».
38. Сейфи Т.Ф. Слагаемые высокого качества. – Горький: Волго-Вятское изд-во, 1960.
39. Сейфи Т.Ф., Бакаев В.И., Скворцов Т.П. Производственные основы надежности. – М.: Изд-во стандартов, 1966.

40. CAN/CSA-ISO 10006-98 Quality management - Guidelines to quality in project management. National Standard of Canada. – URL: <https://www.scc.ca/en/standardsdb/standards/7041>.
41. Australian Institute for Project Management. National Competence Standard for Project Management – Guidelines. Australian Institute for Project Management. 1996. Australia.
42. *Chung K., Lee H.C., Jung K.H.* Korean Management: Global Strategy and Cultural Transformation. – Berlin and New York: Walter de Gruyter, 1997.
43. Guidebook of Project & Program Management for Enterprise Innovation (P2M). – 2005. – URL: <http://www.pmaj.or.jp/ENG/>.
44. *Адизес И.* Управление жизненным циклом корпорации = Managing Corporate Lifecycles. – СПб.: Питер, 2007. – 384 с. – (Теория менеджмента). – ISBN 978-5-469-01523-9.
45. *Webb J.F.* Space Age Management. – NY.: McGraw-Hill Book Company, 1969.
46. Квалификационный справочник должностей руководителей, специалистов и других служащих утвержден постановлением Минтруда России от 21 августа 1998 г. № 37.
47. Приказ Министерства образования и науки РФ от 12 сентября 2013 г. N 1061 "Об утверждении перечней специальностей и направлений подготовки высшего образования" (с изменениями и дополнениями).
48. Совет Европы: Симпозиум по теме «Ключевые компетенции для Европы»: Док. DECS / SC / Sec. (96) 43. – Берн, 1996.
49. Shared 'Dublin' descriptors for Short Cycle, First Cycle, Second Cycle and Third Cycle Awards. A report from a Joint Quality Initiative informal group (contributors to the document are provided in the Annex). 18 October 2004. – Режим доступа: [http://www.nvao.net/page/downloads/Dublin\\_Descriptors.pdf](http://www.nvao.net/page/downloads/Dublin_Descriptors.pdf).
50. Kommunique von Maastricht zu den zukünftigen Prioritäten der europäischen Zusammenarbeit in der Berufsbildung, Maastricht 14. Dezember 2004.
51. Der europäische Qualifikationsrahmen für lebenslanges Lernen (EQR), Luxemburg 2008. – Режим доступа: [http://ec.europa.eu/dgs/education\\_culture/publ/pdf/eqf/broch\\_de.pdf](http://ec.europa.eu/dgs/education_culture/publ/pdf/eqf/broch_de.pdf).
52. Макет: Рамки профессиональных квалификаций в области управления персоналом. Национальный совет при Президенте Российской Федерации по профессиональным квалификациям. – Режим доступа: <http://sovethr.ru/wp-content/uploads/2016/12/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82-%D0%9E%D0%A0%D0%9A-HR-v1.pdf>.
53. *Backlund F., Choronner D., Sundqvist E.* Project Management Maturity Models. A Critical Review. A case study within Swedish engineering and construction organizations // 27th IPMA World Congress. – 2014. – No. 119. – P. 837-846.
54. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide), 5th Edition, Project Management Institute (PMI), USA, 2012.
55. A guidebook of Projekt&Program Management For Enterprise Innovation. PMCC/ENNA, Japan, 2002.
56. "HERMES". Federal IT Steering Unit FITSU. Swiss Government. Retrieved 13 May 2016.
57. *Bloom, B.S. and Krathwohl D.R.* Taxonomy of Educational Objectives: The Classification of Educational Goals, by a committee of college and university examiners. Handbook I: Cognitive Domain. NY, NY: Longmans, Green, 1956.
58. *Anderson J.W., Krathwohl D.R., Airasia P.W.* A Taxonomy for learning, teaching and assessing: a revision of Bloom's taxonomy of education. – New York, 2003. – 336 p.
59. *Bellman R.* Dynamic programming, Princeton University Press, New Jersey, 1957.
60. *Gorban A.N., Tyukina T.A., Smirnova E.V., Pokidysheva L.I.* Evolution of adaptation mechanisms: adaptationenergy, stress, and oscillating death // J. of Theoretical Biology. – 2016. – P. 127-139.
61. *Масаев С.Н.* Концепция построения структуры управления динамической системой // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2021. – Т. 64, № 1. – С. 40-46. – Doi 10.17586/0021-3454-2021-64-1-40-46.
62. *Масаев С.Н.* Идентификация объекта как системы на основе интегральных показателей // Информатизация и связь. – 2020. – № 6. – С. 65-67.
63. *Masaev S.N.* Assessment various control methods a digital copy of enterprise by integral indicator // Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. – P. 32011. – Doi: 10.1088/1742-6596/1679/3/032011.

64. *Masaev S.N., Dorrer G.A., Cyganov V.V.* Acceptable area of optimal control for a multidimensional system // *Journal of Physics: Conference Series*, Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020. – P. 22091. – Doi: 10.1088/1742-6596/1679/2/022091.
65. *Masaev S.N.* 2019 Destruction of the Resident Enterprise in the Special Economic Zone with Sanctions Twelfth Int. Conf. "Management of large-scale system development" (MLSD) (Moscow: Russia, IEEE). – P. 1-5. – Doi: 10.1109/MLSD.2019.8910997.

REFERENCES

1. *Viner N.* *Kibernetika [Cybernetics]*. 2nd ed. Moscow: Sov. radio, 1968, 258 p.
2. *Krasovskiy A.A.* *Istoricheskiy ocherk razvitiya i sostoyaniya teorii upravleniya [Historical outline of the development and state of control theory]*, *Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya [Modern Applied Control Theory]*. Part I. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 400 p.
3. *Tsyupkin Ya.Z.* *Adaptatsiya i obuchenie v avtomaticheskikh sistemakh [Adaptation and training in automatic systems]*. Moscow: Nauka, 1968, 400 p.
4. *Ressler O.E.* *Chemical Turbulence: Chaos in a Small Reaction-Diffusion System*, *Naturforsch*, 1976, Vol. 31, pp. 1168-1172.
5. *Tyukin I.* *Adaptation in Dynamical Systems*. UK, Cambridge University Press, 2011, 410 p.
6. *Lorenz E.N.* *Deterministic Nonperiodic Flow*, *J. Atoms. Sci.*, 1963, Vol. 20, No. 2, pp. 130-141.
7. *Birkhof Dzh.* *Dinamicheskie sistemy [Dynamic systems]*. Moscow: OGIZ, 1999, 480 p. ISBN 5-7029-0356-0.
8. *Gukenkheymer Dzh., Kholms F.* *Nelineynye kolebaniya, dinamicheskie sistemy i bifurkatsii vektornykh poley [Nonlinear oscillations, dynamical systems and bifurcations of vector fields]*, 2002, 560 p. ISBN 5-93972-200-8.
9. *Palis Zh., di Melu V.* *Geometricheskaya teoriya dinamicheskikh sistem: Vvedenie [Geometric theory of dynamical systems: Introduction]*. Moscow: Mir, 1986, 301 p.
10. *Golestani M., Mohammadzaman I., Yazdanpanah M.J.* *Robust Finite-Time Stabilization of Uncertain Nonlinear Systems Based on Partial Stability*, *Nonlinear Dynamics*, 2016, Vol. 85, No. 1, pp. 87-96.
11. *Haddad W.M., L'Afflitto A.* *Finite-Time Partial Stability and Stabilization, and Optimal Feedback Control*, *Journal of the Franklin Institute*, 2015, Vol. 352, No. 6, pp. 2329-2357.
12. *Jammazi C., Abichou A.* *Controllability of Linearized Systems Implies Local Finite-Time Stabilizability: Applications to Finite-Time Attitude Control*, *Journal of Mathematical Control and Information*, 2018, Vol. 35, No. 1, pp. 249-277.
13. *Jenkins M., et al.* *Export Processing Zones in Latin America*. Harvard Institute for International Development, Development Discussion Paper, 1998, No. 646 (August).
14. *Kumar A., Shankar R., Choudhary A., Thakur L.S.* *A big data MapReduce framework for fault diagnosis in cloud-based manufacturing*, *International Journal of Production Research*, 2016, Vol. 54 (23), pp. 7060-7073.
15. *L'Afflitto A.* *Differential Games, Finite-Time Partial-State Stabilization of Nonlinear Dynamical Systems, and Optimal Robust Control*, *International Journal of Control*, 2017, Vol. 90, No. 9, pp. 1861-1878.
16. *Leontief W.W.* "The Structure of American Economy," 1919-1939. Cambridge, Harvard University Press, 1941.
17. *Krotov V.F.* *Osnovy optimal'nogo upravleniya [The basics of optimal management]*. Moscow: Vysshaya shkola, 1990, 430 p.
18. *Kleyner G.B.* *Proizvodstvennye funktsii: Teoriya, metody, primeneniye [Production functions: Theory, methods, application]*. Moscow: Finansy i statistika, 1986, 239 p.
19. *Kantorovich L.V.* *Matematiko-ekonomicheskie raboty [Mathematical and economic work]*. Novosibirsk: Nauka, 2011, 760 p.
20. *Solow R.* *A Contribution to the Theory of Economic Growth*, *Quarterly Journal of Economics*, 1956, No. 70, pp. 65-94.
21. *Schminke A., J. Van Biesebroeck.* *Using export market performance to evaluate regional preferential policies in China*, *Review of World Economics (Weltwirtschaftliches Archiv)*. Springer; Institut für Weltwirtschaft (Kiel Institute for the World Economy), June 2013, Vol. 149 (2), pp. 343-367.

22. *Masaev S.N.* Model' mezhotraslevogo balansa Leont'eva kak zadacha upravleniya dinami-cheskoy sistemoy [Leontev input-output balance model as a dynamic system control problem], *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering], 2021, No. 2 (135), pp. 66-82. Doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-2-66-82>.
23. *Masaev S.N.* Metodika kompleksnoy otsenki upravlencheskikh resheniy v proizvodstvennykh sistemakh s primeneniem korrelyatsionnoy adaptometrii: dis. ... kand. tekhn. nauk [Methodology for the integrated assessment of managerial decisions in production systems using correlation adaptometry: cand. of eng. sc. diss]: 05.13.06: protected 25.03.11: approved 25.11.11. Krasnoyarsk: SFU, 2011, 214 p.
24. *Masaev S.N.* Sposob identifikatsii ob"ekta kak sistemy [Method of identifying object as system]. Patent RF, No. 2741138, 2021.
25. *Masaev S.* Depth of Planning the State of a Dynamic Discrete System by Autocorrelation Function, *Proceedings - 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020*. Sochi, 2020, pp. 989-993. Doi 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208187.
26. *Masaev S.N.* Algoritm otsenki sostoyaniya sistemy (sanktsii, HR, TQM, PMBOK, COVID-19, pozharnaya bezopasnost') metodom integral'nykh pokazateley [Algorithm for assessing the state of the system (sanctions, HR, TQM, PMBOK, Covid-19, fire safety) by the method of integrated indicators], *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics], 2021, No. 1, pp. 36-48. Doi 10.24143/2072-9502-2021-1-36-48.
27. *Doran G.T.* There's a S.M.A.R.T. way to write management's goals and objectives, *Management Review*. СФУ 1981. СФУ Vol. 70. СФУ Is. 11 (AMA Forum). СФУ P. 35, 36.
28. *Chandler A.D.* Strategy and Structure: A Chapter in the History of Industrial Enterprises. Cambridge, Mass, MIT Press, 1962, 463 p.
29. BS 7799-3:2006 "Information security management systems – Part 3: Guidelines for information security risk management".
30. *Forsberg K. and Mooz H.* The Relationship of Systems Engineering to the Project Cycle, *The 12th INTERNET World Congress on Project Management, Center for Systems Management Oslo, Norway, 1994*, 12 p.
31. "HERMES". Federal IT Steering Unit FITSU. Swiss Government. Retrieved 13 May 2016.
32. VZPM Verein zur Zertifizierung von Projektmanagern der SPM Gesellschaft fur Projektmanagement and der SGO Gesellschaft fur Organisation: Beurteilungsstruktur, Begleitmaterial zur Zertifizierung von Projektmanagern, Switzerland, Ausgabe 1996, Version 1.00 vom 30.11.1996.
33. *Ebel N.* PRINCE 2:2009 TM – fur Projekt management mit Methode. Munchen, Addison-Wesley Verlag, 2011, 568 p.
34. DIN 69901-1 Projektmanagement – Projektmanagementsysteme Teil1: Grundlagen. Berlin: Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen (NQSZ) im DIN, 2009, 30 p.
35. ISO Guide 73:2002. Risk management - Vocabulary - Guidelines for use in standards.
36. ISO/IEC 13335-1:2004. Information technology – Security techniques – Management of information and communications technology security – Part 1: Concepts and models for information and communications technology security management.
37. GOST 1.2–2015 «Mezhgosudarstvennaya sistema standartizatsii. Standarty mezhgosudarstvennyye, pravila i rekomendatsii po mezhgosudarstvennoy standartizatsii. Pravila razrabotki, prinyatiya, obnovleniya i otmeny» [GOST 1.2–2015 «Mezhgosudarstvennaya sistema standartizatsii. Standarty mezhgosudarstvennyye, pravila i rekomendatsii po mezhgosudarstvennoj standartizatsii. Pravila razrabotki, prinyatiya, obnovleniya i otmeny»].
38. *Seyfi T.F.* Slagaemye vysokogo kachestva [High quality components]. Gor'kiy: Volgo-Vyatskoe izd-vo, 1960.
39. *Seyfi T.F., Bakaev V.I., Skvortsov T.P.* Proizvodstvennyye osnovy nadezhnosti [Manufacturing fundamentals of reliability]. Moscow: Izd-vo standartov, 1966.
40. CAN/CSA-ISO 10006-98 Quality management - Guidelines to quality in project management. National Standard of Canada. Available at: <https://www.scc.ca/en/standardsdb/standards/7041>.

41. Australian Institute for Project Management. National Competence Standard for Project Management – Guidelines. Australian Institute for Project Management. 1996. Australia.
42. *Chung K., Lee H.C., Jung K.H.* Korean Management: Global Strategy and Cultural Transformation. Berlin and New York: Walter de Gruyter, 1997.
43. Guidebook of Project & Program Management for Enterprise Innovation (P2M), 2005. Available at: <http://www.pmaj.or.jp/ENG/>.
44. *Adizes I.* Upravlenie zhiznennym tsiklom korporatsii = Managing Corporate Lifecycles [Managing Corporate Lifecycles]. Saint Petersburg: Piter, 2007, 384 p. (Teoriya menedzhmenta). ISBN 978-5-469-01523-9.
45. *Webb J.F.* Space Age Management. NY.: McGraw-Hill Book Company, 1969.
46. Kvalifikatsionnyy spravochnik dolzhnostey rukovoditeley, spetsialistov i drugikh sluzhashchikh utverzhen postanovleniem Mintruda Rossii ot 21 avgusta 1998 g. № 37 [The qualification reference book of the positions of managers, specialists and other employees was approved by the decree of the Ministry of Labor of Russia dated August 21, 1998 No. 37].
47. Prikaz Ministerstva obrazovaniya i nauki RF ot 12 sentyabrya 2013 g. N 1061 "Ob utverzhenii perechnykh spetsial'nostey i napravleniy podgotovki vysshego obrazovaniya" (s izmeneniyami i dopolneniyami) [Order of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation of September 12, 2013 N 1061 "On approval of the lists of specialties and areas of training for higher education" (with amendments and additions)].
48. Sovet Evropy: Simpozium po teme «Klyuchevye kompetentsii dlya Evropy» [Council of Europe: Symposium on Key Competencies for Europe]: Dok. DECS / SC / Sec. (96) 43. Bern, 1996.
49. Shared 'Dublin' descriptors for Short Cycle, First Cycle, Second Cycle and Third Cycle Awards. A report from a Joint Quality Initiative informal group (contributors to the document are provided in the Annex). 18 October 2004. Available at: [http://www.nvao.net/page/downloads/Dublin\\_Descriptors.pdf](http://www.nvao.net/page/downloads/Dublin_Descriptors.pdf).
50. Kommunique von Maastricht zu den zukünftigen Prioritäten der verstärkten europäischen Zusammenarbeit in der Berufsbildung, Maastricht 14. Dezember 2004.
51. Der europäische Qualifikationsrahmen für lebenslanges Lernen (EQR), Luxemburg 2008. Available at: [http://ec.europa.eu/dgs/education\\_culture/publ/pdf/eqf/broch\\_de.pdf](http://ec.europa.eu/dgs/education_culture/publ/pdf/eqf/broch_de.pdf).
52. Maket: Ramki professional'nykh kvalifikatsiy v oblasti upravleniya personalom. Natsional'nyy sovet pri Prezidente Rossiyskoy Federatsii po professional'nym kvalifikatsiyam [Layout: Framework for professional qualifications in personnel management. National Council for Professional Qualifications under the President of the Russian Federation]. Available at: <http://sovethr.ru/wp-content/uploads/2016/12/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82-%D0%9E%D0%A0%D0%9A-HR-v1.pdf>.
53. *Backlund F., Choronner D., Sundqvist E.* Project Management Maturity Models. A Critical Review. A case study within Swedish engineering and construction organizations, *27th IPMA World Congress*, 2014, No. 119, pp. 837-846.
54. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide), 5th Edition, Project Management Institute (PMI), USA, 2012.
55. A guidebook of Projekt&Program Management For Enterprise Innovation. PMCC/ENNA, Japan, 2002.
56. "HERMES". Federal IT Steering Unit FITSU. Swiss Government. Retrieved 13 May 2016.
57. *Bloom, B.S. and Krathwohl D.R.* Taxonomy of Educational Objectives: The Classification of Educational Goals, by a committee of college and university examiners. Handbook I: Cognitive Domain. NY, NY: Longmans, Green, 1956.
58. *Anderson J.W., Krathwohl D.R., Airasia P.W.* A Taxonomy for learning, teaching and assessing: a revision of Bloom's taxonomy of education. New York, 2003, 336 p.
59. *Bellman R.* Dynamic programming, Princeton University Press, New Jersey, 1957.
60. *Gorban A.N., Tyukina T.A., Smirnova E.V., Pokidysheva L.I.* Evolution of adaptation mechanisms: adaptation energy, stress, and oscillating death, *J. of Theoretical Biology*, 2016, pp. 127-139.
61. *Masaev S.N.* Kontseptsiya postroeniya struktury upravleniya dinamicheskoy sistemoy [The concept of creating a dynamic system control structure]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2021, Vol. 64, No. 1, pp. 40-46. Doi: 10.17586/0021-3454-2021-64-1-40-46.
62. *Masaev S.N.* Identifikatsiya ob"ekta kak sistemy na osnove integral'nykh pokazateley [Identification of an object as a system based on integral indicators], *Informatizatsiya i svyaz'* [Informatization and communication], 2020, No. 6, pp. 65-67.

63. *Masaev S.N.* Assessment various control methods a digital copy of enterprise by integral indicator, *Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020*, pp. 32011. Doi 10.1088/1742-6596/1679/3/032011.
64. *Masaev S.N., Dorrer G.A., Cyganov V.V.* Acceptable area of optimal control for a multidimensional system, *Journal of Physics: Conference Series, Krasnoyarsk, Russian Federation, 2020*, pp. 22091. Doi 10.1088/1742-6596/1679/2/022091.
65. *Masaev S.N.* 2019 Destruction of the Resident Enterprise in the Special Economic Zone with Sanctions Twelfth Int. Conf. "Management of large-scale system development" (MLSD) (Moscow: Russia, IEEE), pp. 1-5. Doi: 10.1109/MLSD.2019.8910997.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.В. Ковалев.

**Масаев Сергей Николаевич** – Сибирский федеральный университет; e-mail: faberi@list.ru; г. Красноярск, Россия; к.т.н.; доцент.

**Masaev Sergei Nikolaevich** – Siberian Federal University; e-mail: faberi@list.ru; Krasnoyarsk, Russia; cand. of eng. sc.; assistant professor.

УДК 004.032

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-32-42

**С.М. Гушанский, В.И. Божич, В.С. Потапов**

### **РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ И РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В РАМКАХ КВАНТОВЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ**

*В последнее время наблюдается стремительный рост интереса к квантовым компьютерам. Их работа основана на использовании для вычислений таких квантово-механических явлений, как суперпозиция и запутывание для преобразования входных данных в выходные, которые реально смогут обеспечить эффективную производительность на 3–4 порядка выше, чем любые современные вычислительные устройства, что позволит решать перечисленные выше и другие задачи в натуральном и ускоренном масштабе времени. Данная статья посвящена решению задачи исследования и разработки методов оптимизации квантовых вычислений в рамках применения квантовых ускорителей. Предложена структурная схема аппаратного ускорителя для увеличения производительности моделируемых квантовых вычислений. Была проведена разработка структурной схемы модуля связи аппаратного ускорителя и программной модели. Актуальность данных исследований заключается в математическом и программном моделировании и реализации корректирующих кодов для исправления нескольких видов квантовых ошибок в рамках разработки и выполнения квантовых алгоритмов для решения классов задач классического характера. Научная новизна данного направления выражается в исключении одного из недостатков квантового вычислительного процесса. Научная новизна данного направления в первую очередь выражается в постоянном обновлении и дополнении поля квантовых исследований по ряду направлений, а компьютерная симуляция квантовых физических явлений и особенностей слабо освещена в мире.*

*Моделирование; квантовый алгоритм; кубит; модель квантового вычислителя; запутывание; суперпозиция; квантовый оператор; сложность алгоритма.*

**S.M. Gushanskiy, V.I. Bozhich, V.S. Potapov**

### **DEVELOPMENT OF METHODS OF OPTIMIZATION AND PARALLELIZATION OF COMPUTATIONAL PROCESSES IN QUANTUM ACCELERATORS**

*Recently, there has been a rapid increase in interest in quantum computers. Their work is based on the use of quantum-mechanical phenomena such as superposition and entanglement for computing to transform input data into outputs that can actually provide effective performance 3–4 orders of magnitude higher than any modern computing devices, which will allow solving the*